一种改进的电动汽车用异步电机参数离线辨识方法研究

史文凡[1]　贾洪平[1]　颜建虎[2]　于　杏[2]
（1. 江苏大学电气信息工程学院　镇江　212000）
（2. 南京理工大学自动化学院　南京　210094）



史文凡　男　1989年生，硕士研究生，研究方向为异步电机控制技术研究。



贾洪平　男　1972年生，副教授，研究方向为异步电机驱动控制。

摘要：本文提出了一种异步电机参数离线辨识的改进算法。对传统直流实验进行改进，得到等效的控制电路来完成定子电阻的辨识。然后利用单相交流堵转实验来辨识定子漏感和转子电阻。在 *V/f* 空载实验中，采用计算无功功率来辨识电机互感的方法，避免了传统空载实验中复杂的 FFT 计算过程。最后，在一台额定功率为 3.5kW 的异步电机上进行了参数辨识的仿真与实验研究。结果表明，本文所提出的方法在工程应用中简易可行，辨识得到的电机参数具有较高的准确性。

关键词：异步电机　参数离线辨识　矢量控制　无功功率
中图分类号：TM921

An Improved Off-Line Identification Method of Asynchronous Motor Parameters for Electric Vehicles

Shi Wenfan[1]　*Jia Hongping*[1]　*Yan Jianhu*[2]　*Yu Xing*[2]
（1. Jiangsu University　Zhenjiang　212000　China）
（2. Nanjing University of Science and Technology　Nanjing　210094　China）

Abstract: This paper presents an improved algorithm for off-line identification of asynchronous motor parameters. The traditional DC experiment is improved to obtain the equivalent control circuit to realize the stator resistance identification. And then the single-phase AC locked rotor experiment is used to identify the stator leakage inductance and rotor resistance. In the V/f no load experiment, the motor mutual inductance is identified by calculating the reactive power to avoid the complex FFT calculation in the traditional no-load experiments. Finally the simulation and experiment of parameter identification areimplementedfor a 3.5kW asynchronous motor respectively. The results show that this presented method is simple and feasible in engineering control application and has higher precision.

Keywords: Asynchronous motor, parameter offline identification, vector control, reactive power

国家自然科学基金（51407094）和江苏省自然科学基金（BK20140785）项目。

1　引言

异步电机具有结构简单、制造方便、成本低廉，且坚固耐用、运行可靠、可用于恶劣环境等优点，被广泛应用于电动汽车驱动系统中[1]。异步电机控制系统中具有代表性的方法有：开环 V/f 控制、转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制等，其中矢量控制技术应用最为广泛，它使异步电机可以实现较宽的转速范围、较大的输出瞬时功率和较快的转矩响应速度。但在矢量控制中，转子磁链角的估算、速度环和电流环中 PI 调节器的参数自整定对电机参数的精度均有较高要求[2]。

异步电机的主要参数包括定子电阻、转子电阻、定子漏感、转子漏感和定转子之间互感。目前，异步电机的参数辨识主要分为离线和在线辨识[3]。在线辨识的算法主要有神经网络算法、遗传算法等。以上方法能对电机参数进行实时整定，提高控制系统的精度，但同时存在一定的缺点。如扩展卡尔曼滤波法需要给定系统噪声且算法较为复杂；遗传算法难以处理非线性约束，稳定性较差，所以在线辨识在实际应用中非常困难[4-8]。离线辨识的传统方法是空载实验和堵转实验[9]，它能准确地测量电机参数，但由于受到现场条件的限制，不适合变频调速系统。基于此，学者们提出了许多离线自动辨识方法[11-15]，文献 [11] 采用脉冲电压法和脉冲电流法，但数据处理方法略显复杂。文献 [12] 基于间接矢量控制系统进行参数辨识，对直流实验做了一些改进，但总漏感通过估算得到，因此会引入积累误差。文献 [13] 在空载实验时提出转差频率控制，能消除开环时可能出现的电流振荡，但需要加入定子电压传感器。文献 [14] 采用阶跃电压试验来消除漏感，可以消除总漏感的积累误差，但增加了测试的复杂度。文献 [15] 在电压重构时根据电流极性来补偿逆变器死区引起的电压误差，但计算量大。

本文在现有方法的基础上，提出了一种基于无功功率计算的异步电机定转子互感参数离线辨识方法，避免了传统互感辨识方法复杂的 FFT 计算过程。最后，对一台 3.5kW 的异步电机进行仿真和实验研究，结果证明该方法具有较高的准确性和有效性。

2　参数离线辨识

图 1 为异步电机驱动系统主电路，其中逆变器的三对桥臂 A、B、C 分别与异步电机 M 的三相定子绕组相连。

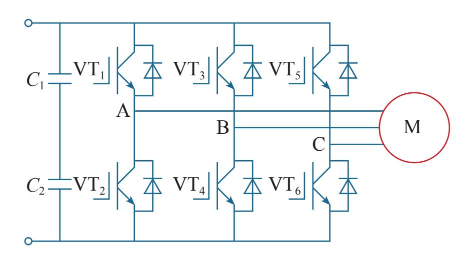
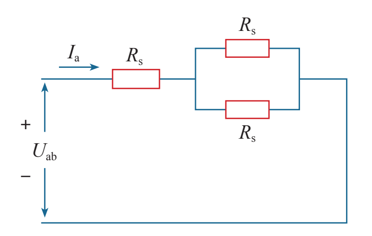


图 1　异步电机变频调速主电路

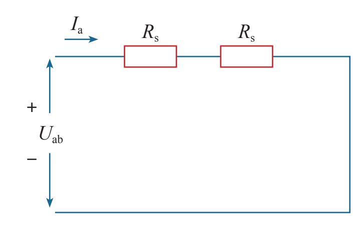
Fig.1　Main circuit of variable frequency control system of asynchronous motor

2.1　直流实验

定子电阻 R_s 辨识一般通过直流实验来完成。通常采用图 2a 所示结构，本文在此方法上加以改进，将图 1 中 VT_1、VT_5 导通，其余关断来得到图 2b 所示结构。



（a）VT_1、VT_5 和 VT_6 导通，其余关断



（b）VT_1 和 VT_5 导通，其余关断

图 2　直流实验等效电路

Fig.2　Equivalent circuit of DC test

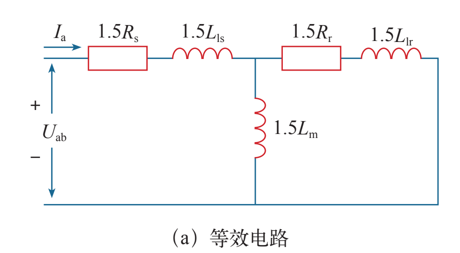
由于本文采用逆变器供电，不能直接在电机上施加直流电压，所以采用 PWM 斩波的方式来调节施加在电机上的电压值。通过控制 6 个功率管 VT_1 ~ VT_6 的开关状态来实现定子电阻辨识。PWM 斩波的占空比是 A 相上桥与 B 相下桥的占空比之差 N。根据设定允许通过的最大电流来相应地改变 B 相的占空比，使回路电流达到设定值。

为了使计算精确，待电流稳定一段时间后，对电机的线电压和线电流进行累加，分别记为 U_{ab} 和 I_a，最后根据式（1）计算定子电阻。

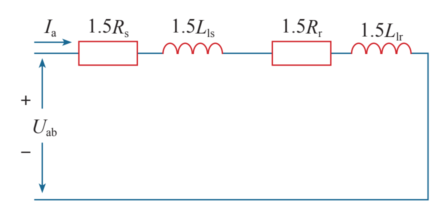
$$R_s = \frac{NU_{ab}}{2I_a} \tag{1}$$

2.2 单相实验

转子电阻 R_r 和定、转子漏感 L_{ls} 辨识可以通过对电机施加单相交流激励来完成。等效电路如图 3a 所示。通常异步电机定、转子漏感相对于互感而言很小，并且近似相等，因此当给定电流频率较高时，可以将电路等效为如图 3b 所示。



（a）等效电路



（b）简化电路

图 3　单相实验等效电路

Fig.3　Equivalent circuit of single-phase test

在两相静止坐标系上，令 $U_\beta=0$，可以保证图 1 中 B、C 两相的控制信号相同，即使 B、C 两相短接，此时电机相当于堵转状态。并将给定电流 I_a^* 与反馈得到的相电流 I_a 经过比例调节 K_p 后得到 U_α，VSI 为电压源逆变器。其控制框图如图 4 所示。

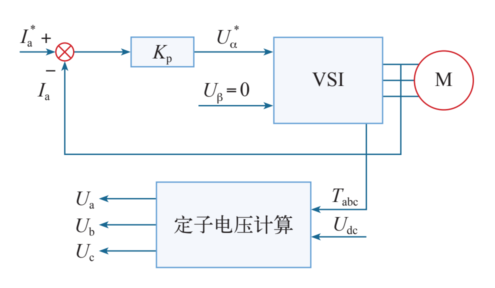


图 4　单相实验控制框图

Fig.4　Control diagram of single-phase test

其中电流给定为

$$I_a^* = \sqrt{2} I \cos(\omega_e^* t) \tag{2}$$

式中，ω_e^* 为给定定子电流角频率；I 为电机额定线电流的有效值。

待电流稳定后，对 A 相和 B 相之间的线电压和 A 相的相电流进行傅里叶变换（FFT），分别得到其基波幅值 U_{ab} 和 I_a，同时得出基波电压和电流之间的相位差 θ。

计算得等效阻抗为

$$Z_{eq} = \frac{U_{ab}}{I_a} \tag{3}$$

等效电阻为

$$R_{eq} = Z_{eq} \cos\theta \tag{4}$$

等效电抗为

$$X_{eq} = Z_{eq} \sin\theta \tag{5}$$

转子电阻为

$$R_r = \frac{2}{3} R_{eq} - R_s \tag{6}$$

定、转子漏感为

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{X_{eq}}{3\omega_e^*} \tag{7}$$

2.3 空载试验

互感 L_m 辨识可以通过空载实验来完成。空载实验采用恒 V/f 方式实现，此时电机转速接近于同步转速，转差率 $s\approx 0$，定子电流基本上等于励磁电流，电机的转子回路相当于开路。等效电路如图 5 所示，控制框图如图 6 所示，其中，f^* 为给定频率；ramp 为平滑变频模块。

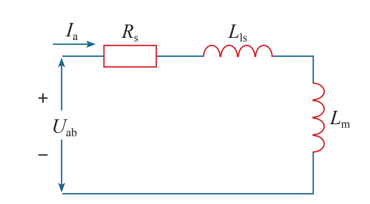


图 5　空载实验等效电路

Fig.5　Equivalent circuit of no-load test

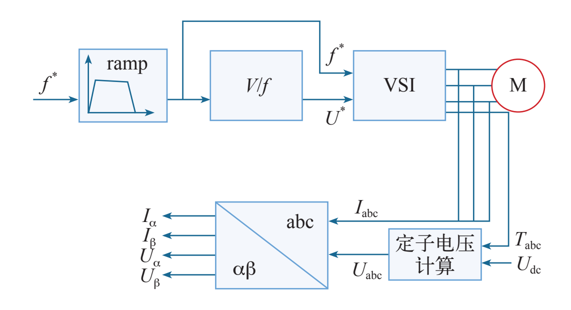


图 6　空载实验控制框图

Fig.6　Control diagram of no-load test

待转速稳定后，通过测得的相电压和相电流经过 Clarke 变换来计算出 U_α，U_β，I_α，I_β 的值，从而可以求出此时电路的无功功率 Q。由于定子漏感相对于互感而言很小，计算时可以忽略，所以可以通过式（9）来计算出互感的值。

$$Q = I_s^2 \omega L_m \tag{8}$$

$$L_m = \frac{Q}{I_s^2 \omega} \tag{9}$$

式中，$I_s^2 = I_\alpha^2 + I_\beta^2$；$\omega$ 为电压、电流的同步角频率。

3　仿真研究

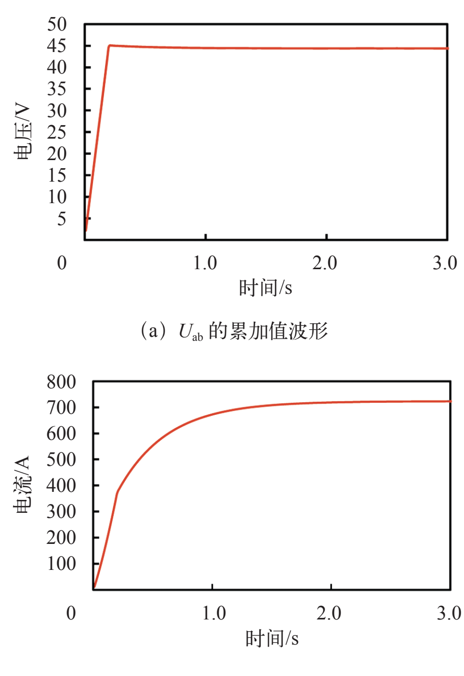
为了验证本文电机参数离线辨识方法的准确性，首先采用了 Matlab/Simulink 对该系统进行了仿真研究。仿真模型中所选电机为额定电压 72V、额定频率 100Hz、额定功率 3.5kW 的异步电机。

3.1　直流实验仿真

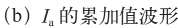
图 7 为直流实验仿真波形图，由图 7a 得出 U_{ab} 累加值为 45V，图 7b 中 I_a 由于定子漏感的存在而延迟一段时间才能达到稳态值，累加值最终稳定在 710A，最后仿真计算得到定子电阻为 0.030 2Ω。

3.2　单相实验仿真

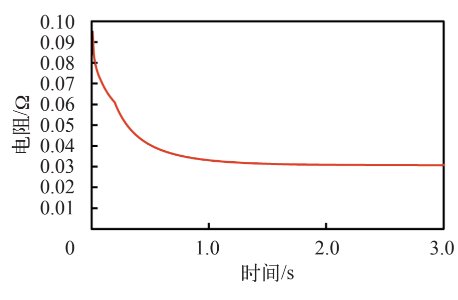
图 8 为单相实验仿真波形图，可以看出经过 FFT 计算后，U_{ab} 的幅值为 5.8V，I_a 的幅值为 47A，最后仿真得到的转子电阻为 0.047 3Ω，漏感为 0.049mH。



（a）U_{ab} 的累加值波形



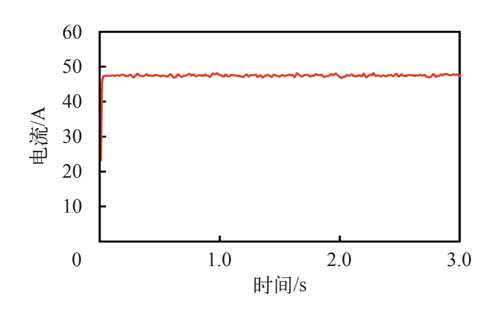
（b）I_a 的累加值波形



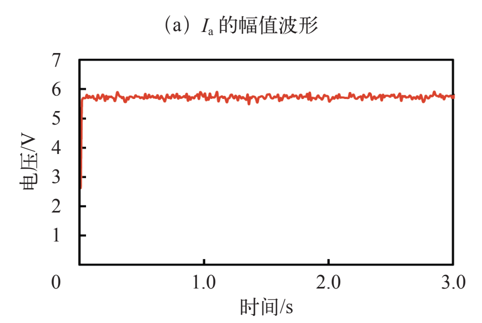
（c）定子电阻波形

图 7　直流实验仿真波形

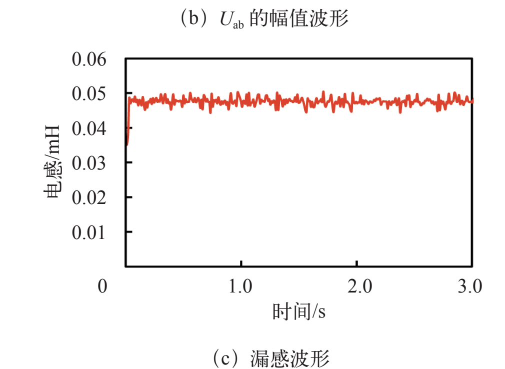
Fig.7　Simulation waveforms of DC test



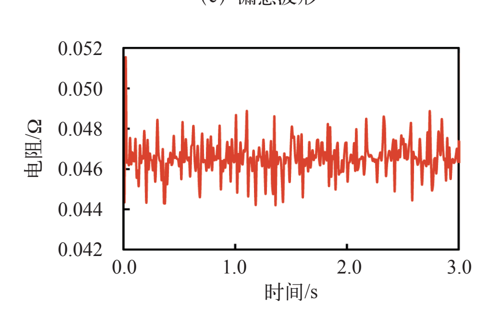
（a）I_a 的幅值波形



（b）U_{ab} 的幅值波形



（c）漏感波形



（d）转子电阻波形

图 8　单相实验仿真波形

Fig.8　Simulation waveforms of single-phase test

3.3 空载实验仿真

图 9 所示为 V/f 空载实验得出的电机互感波形。电机转速稳定后，仿真得到的定、转子之间互感为 1.225mH。

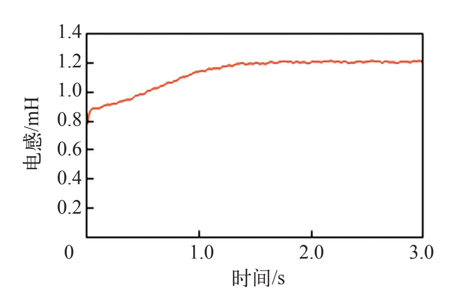


图 9　空载实验仿真波形

Fig.9　Simulation waveform of no-load test

4　实验研究

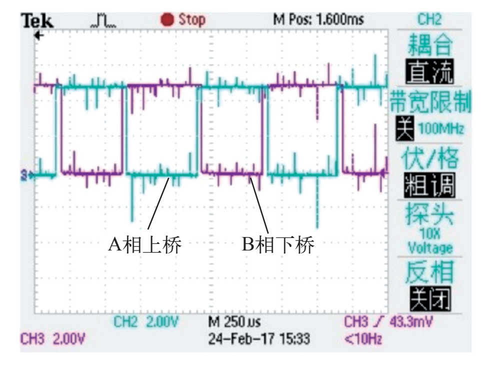
本实验平台是以 TI 公司生产的 DSP 芯片 TMS320F28035 为核心的控制平台，实验电机额定功率为 3.5kW，额定电压为 72V，额定频率 100Hz 的异步电机。

4.1 定子电阻辨识

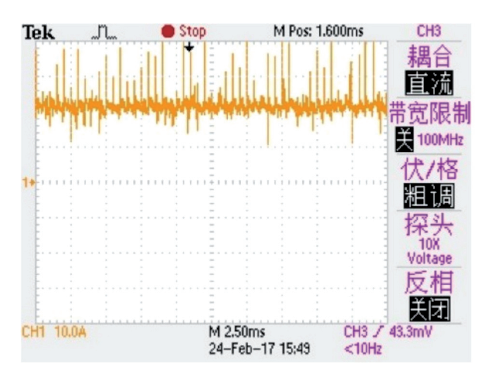
在定子电阻辨识实验中，使图 1 中的 VT_1 和 VT_5 闭合，其余功率管关断。待电流稳定后，开始采样电机的线电压 U_{ab} 和线电流 I_a，共采集 514 次，最后利用式（1）计算定子电阻 R_s。图 10a 为直流实验时 A 相上桥和 B 相下桥波形；图 10b 为累加的线电流波形。

4.2 转子电阻与漏感辨识

在单相交流堵转时，其 A 相给定电流幅值为 180A，给定频率为 78Hz。待电流稳定后，通过 FFT 变换得到 U_{ab}、I_a 的幅值和其相位差 θ，最后利用式（3）～式（7）计算转子电阻和漏感。图 11 为单相实验中 A 相电流和 A、B 相之间线电压的波形。



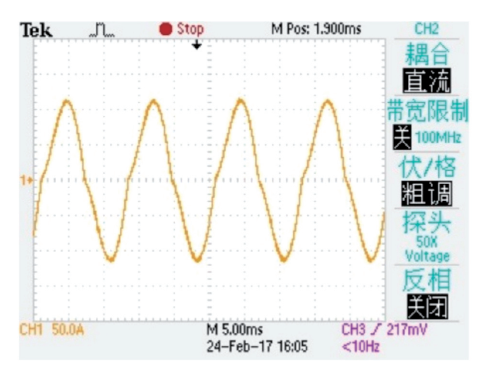
（a）A 相上桥与 B 相下桥的波形



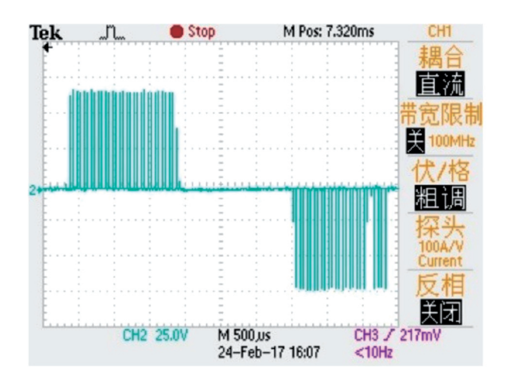
（b）电流 I_a 的波形

图 10　直流实验波形

Fig.10　Experimental waveforms of DC test



（a）辨识期间 I_a 的波形



（b）辨识期间 U_{ab} 的 PWM 波形

图 11　单相实验波形

Fig.11　Experimental waveforms of single-phase test

4.3 电机互感辨识

在 V/f 空载实验中，给定频率为 100Hz，电压幅值为 30V。频率稳定后，通过采样三相电压和电流来进行 Clarke 变换，求出无功功率后利用式（9）求出电机互感。图 12 为空载实验 A、B 相电流波形。

4.4 实验结果分析

下表给出了该实验所用电机的实际值、仿真值以及实验所测值。可以发现，在误差允许范围内实验测值与实际值之间存在微小误差，原因主要如下：

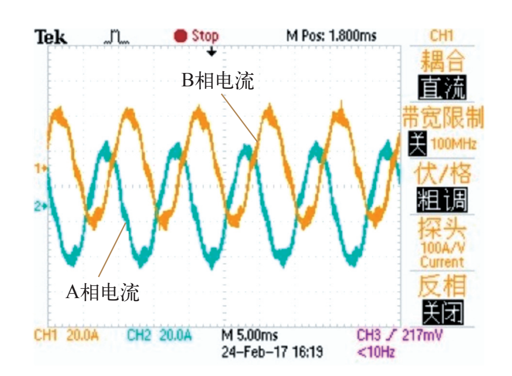


图 12　空载实验波形

Fig.12　Experimental waveform of no-load test

（1）在电压重构计算的过程中，存在死区和功率管管压降的影响。

（2）求解过程中对电机模型作了相应的近似计算。

表　离线辨识实验、传统实验与仿真结果

Tab.　Results of off-line identification test、traditional test and simulation

电机参数	实际值	实验值	仿真值
R_s/Ω	0.0307	0.0298	0.0302
R_r/Ω	0.048	0.0476	0.0473
L_{ls}/mH	0.05	0.048	0.049
L_m/mH	1.268	1.276	1.225

5　结论

本文提出了一种异步电机参数离线辨识的改进算法，该法在辨识电机定、转子之间的互感时，采用了无功功率计算的方法，避免了 FFT 复杂的计算过程。最后对一台额定功率为 3.5kW 的异步电机进行了仿真和实际实验，辨识过程由系统自动完成，并且能够辨识出电机的所有参数。通过对比电机参数的实际值、仿真值和实验值，证明本文方法具有较高的精度，在工程中具有很高的应用价值。

参考文献

[1]　Zeraoulia M, Benbouzid M El H, Diallo D. Electricmotor drive selection issues for HEV propulsionsystems: a comparative study[J]. IEEE Transactionson Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1756-1764.

[2]　王明渝，冼成瑜，慧娅倩．感应电动机矢量控制参数离线辨识技术 [J]．电工技术学报，2006，21(8)：90-96．
Wang Mingyu, Xian Chengyu, Hui Yaqian. An off-line parameter estimation technique for vector controlled induction machine drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 90-96.

[3]　陈康平，曾岳南，李海波，等．基于 TMS320F2812 的异步电机参数离线辨识系统 [J]．电机与控制应用，2013，40(8)：5-8．
Chen Kangping, Zeng Yuenan, Li Haibo, et al. System of off-line parameter identification for AC motor based on TMS320F2812[J]. Electric Machines & Control Application, 2013, 40(8): 5-8.

[4]　Toliyat H A, Wlas M, Krzemiriski Z. Neural-network-based parameter estimations of induction motors[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1783-1794.

[5]　Liaw C M, Wang J B, Chang Y C. A fuzzy adapted field-oriented mechanism for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 11(1): 76-83.

[6]　Sundareswaran K, Shyam H N, Palani S, et al. Induction motor parameter estimation using hybrid genetic algorithm[C]. IEEE Region 10 and the Third International Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur, 2008: 1-6.

[7]　Suman M, Chandan C, Yoichi H, et al. Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 594-601.

[8]　金海，黄进．基于模型参考方法的感应电机磁链的自适应观测及参数辨识 [J]．电工技术学报，2006，21(1)：65-69．
Jin Hai, Huang Jin. Adaptive flux estimation and parameters identification of induction motors based on model reference approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 65-69.

[9]　李建军，盛洁波，王翠，等．异步电机定转子参数的辨识方法研究 [J]．电工技术学报，2006，21(1)：70-74．
Li Jianjun, Sheng Jiebo, Wang Cui, et al. Research on parameter identification method for induction motor[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2006, 21(1): 70-74.

[10] 陈永飞，雷良育，胡 烨，等．基于 Ansoft 电动汽车用轮毂电动机电磁场分析 [J]. 电气应用，2016，35（3）：77-82.

[11] 余功军，钟彦儒，杨耕．无速度传感器矢量控制系统中的电机参数辨识 [J]．电气传动，1999，29(1)：7-10．
Yu Gongjun, Zhong Yanru, Yang Geng. Parameter identification of induction motor in sensor-less vector control inverter[J]. Electric Drive, 1999, 29(1): 7-10.

[12] Lin Y N, Chen C L. Automatic IM parameter measurement under sensorless field-oriented control[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 1999, 46(1): 111-118.

[13] 刘洋，赵金，王庆义．间接矢量控制系统中的异步电机参数辨识 [J]．电工技术学报，2008，23(7)：21-26．
Liu Yang, Zhao Jin, Wang Qingyi. An off-line parameter identification method for indirect vector controlled induction motor drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 21-26.

[14] 罗慧，刘军峰，万淑芸．感应电机参数的离线辨识 [J]．电气传动，2006，36(8)：16-21．
Luo Hui, Liu Junfeng, Wan Shuyun. Off-line identification of induction motor parameter[J]. Electric Drive, 2006, 36(8): 16-21.

[15] 贺艳晖，王跃，王兆安．异步电机参数离线辨识改进算法 [J]．电工技术学报，2011，26(6)：73-80．
He Yanhui, Wang Yue, Wang Zhao’an. An improved off-line parameter identification algorithm for induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 73-80.